Vol. 20 No. 5
Sep., 2023

天 文 研 究 与 技 术
ASTRONOMICAL RESEARCH & TECHNOLOGY

第 20 卷 第 5 期
2023 年 9 月

DOI：10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20230515.001

太阳偏振图像高分辨重建误差仿真分析

吕 卓[1,2,3]，王希群[1,2,3]，王远方舟[1,2,4,5]，金振宇[1,3*]

（1. 中国科学院云南天文台，云南 昆明 650216；2. 中国科学院大学天文与空间科学学院，北京 100049；
3. 云南省太阳物理与空间目标监测重点实验室，云南 昆明 650216；4. 云南师范大学物理与电子信息学院，
云南 昆明 650500；5. 云南省光电信息技术重点实验室，云南 昆明 650500）

摘要：地基太阳望远镜磁像仪在进行偏振测量时会受到大气湍流的影响，导致测量结果不准确。通过同步探测波前像差，对太阳窄带偏振图像退卷积重建的方法可以克服窄带滤光器带来的偏振测量通道光子数水平较低等问题，将高分辨图像重建算法应用到太阳偏振图像的重建中。在重建过程中，波前估计不准确会导致重建的偏振图像受到 I 的串扰，与真实的偏振信号之间存在一定偏差。为了研究同步重建过程中波前复原精度对偏振图像重建精度的影响，通过建立仿真模型，对不同视宁度和不同波前复原精度下 I 对偏振信号的串扰进行了仿真。结果表明，偏振图像的重建质量与波前复原精度正相关，在一定的条件下，增加用于图像重建的帧数和降低图像分辨率等方法也可以降低 I 对偏振信号的串扰。

关键词：太阳偏振测量；高分辨率图像重建；波前探测；误差分析

中图分类号：P182.2 **文献标识码**：A **文章编号**：1672-7673(2023)05-0453-10

地基太阳望远镜磁场测量仪器的工作原理主要是基于塞曼效应，对太阳磁敏谱线进行偏振测量，再由 I, Q, U 和 V 共 4 个偏振信号反演太阳矢量磁场信息[1]。其中，磁像仪是一类基于可调谐窄带滤光器和偏振分析器的成像型磁场测量仪器，依托大口径太阳望远镜，能以较高的空间分辨率和光谱分辨率对太阳磁场进行二维观测。

在实际观测过程中，由于探测器只对光强信息敏感，需要将偏振信号调制到光强信号中进行采集，再由拍摄到的图像解调出偏振信号。在这个过程中，由于地球大气湍流的影响，探测器拍摄到的太阳图像会出现模糊、抖动和畸变等现象，使得用于解调偏振信号的两帧图像存在不同程度的像差和噪声，进而无法解调出准确的偏振信号。

为克服大气湍流对地基观测的影响，地基太阳望远镜在改善成像通道像质方面积累了丰富的技术和经验，常用的方法主要有两类：自适应光学技术[2]和事后图像重建算法[3]。其中自适应光学系统由波前探测器、波前控制器和波前校正器三部分组成，可以实时探测大气波前，并校正部分低阶像差。事后重建算法既可以作为自适应光学系统的补充，对未校正的高阶像差进行补偿，又可以独立工作，基于统计信息或约束条件构建代价函数，计算目标信息。如 1 m 新真空太阳望远镜(New Vacuum Solar Telescope, NVST)为成像观测通道配备了基于斑点干涉术和斑点掩膜法的高分辨图像重建系统，可以为太阳学界提供高分辨率的太阳光球和色球图像进行科学研究[4]。

用于太阳磁场测量的夫琅禾费(Fraunhofer)谱线均为吸收线，对该谱线的扫描观测要求窄带滤光器的带宽达到 0.01 nm 量级[5]。极窄的透过率使得该窄带通道的光子数水平较低，进行短曝光采集时图像的信噪比较差，长曝光采集则降低偏振测量的时间分辨率，且会被大气湍流平滑掉图像的高频信息。针对窄带通道图像难以直接重建的问题，文[6]首次引入一个与窄带偏振测量通道中心波长相近

基金项目：国家自然科学基金（11833010）资助.
收稿日期：2023-04-11；修订日期：2023-04-28
作者简介：吕 卓，男，硕士研究生，主要研究高分辨太阳磁场测量技术. Email：lvzhuo@ynao.ac.cn.
* 通信作者：金振宇，男，研究员，主要研究天文技术与方法. Email：kim@ynao.ac.cn.

的宽带通道，由斑点成像术得到宽带通道的光学传递函数，再由该光学传递函数对窄带退化图像退卷积重建，与长曝光图像相比，重建图像的空间分辨率提高了 5 倍[6]。此后各大太阳望远镜在设计磁像仪时均借鉴了该思路[7-9]，在窄带偏振测量通道旁增加一个宽带波前探测通道，用于估计波前像差和不同偏振态图像的精确对齐等。

对窄带偏振图像的高分辨重建可以恢复窄带图像丢失的中高频信息，提高空间分辨率，但它对目标的重建本质上是基于特定成像模型的一种估计。重建过程对数据的改变比平场和暗场复杂得多，因此，当用于解调偏振信号的两帧调制图像的重建质量不一致时，会引入较难去除的光强信号的串扰等误差。本文通过建立仿真模型，对不同视宁度、不同波前像差估计精度下，光强信号对偏振信号的串扰水平进行了研究，并研究了图像帧数和分辨率等因素对偏振图像重建质量的影响。

1 理论模型

1.1 窄带图像的高分辨重建

如图 1 为同步采集系统的光路结构。在分光镜之前，两通道图像经历的光学像差相同，对两通道图像进行严格的同步采集，则可以通过信噪比较高的宽带波前探测通道图像估计大气波前信息，进而得到窄带通道的点扩散函数，实现对窄带观测目标的重建。太阳观测中常用的波前探测器主要有相关哈特曼波前传感器[2]和相位差波前复原方法[10]等。

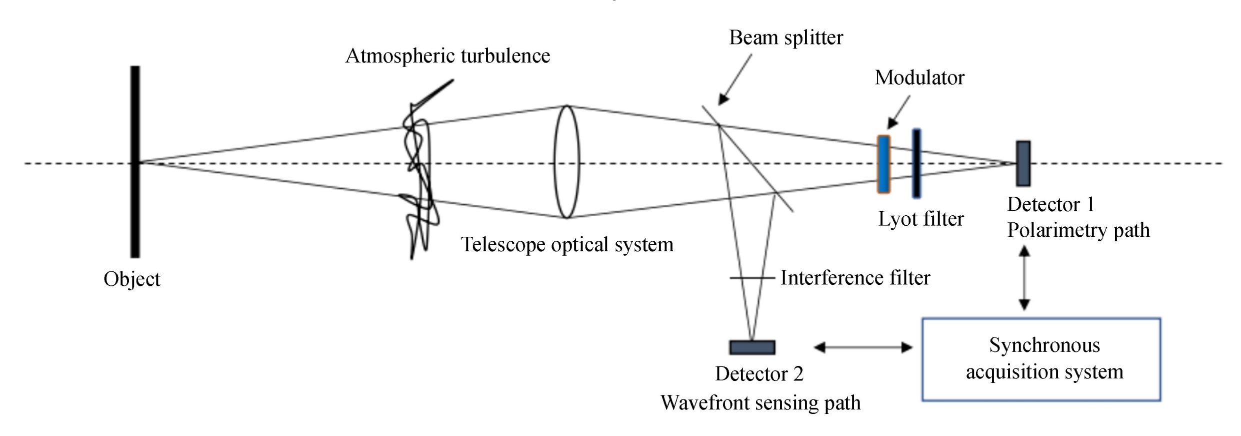


图 1 同步采集系统光路结构示意图

Fig. 1 Optical structure of synchronous acquisition system

在线性空不变系统中，探测器采集的图像是观测目标与大气-望远镜系统点扩散函数的卷积。假设 o 为观测目标，s 为实际观测到的图像，h 为对应的点扩展函数，使用 $*$ 表示卷积运算，偏振测量通道图像在空域内满足

$$s = o * h\,, \tag{1}$$

相应地，在频域满足

$$S = OH\,, \tag{2}$$

其中，S，O 和 H 分别为 s，o 和 h 的频谱。由宽带波前探测通道估计该通道波前像差 $\hat{\varphi}_b$ 后，将该像差转换为窄带通道中心波长对应的像差 $\hat{\varphi}_n = \frac{\lambda_b}{\lambda_n}\hat{\varphi}_b$，其中，$\lambda_b$ 和 λ_n 分别为波前探测通道和偏振测量通道的中心波长，由 $\hat{\varphi}_n$ 结合望远镜孔径函数计算偏振测量通道对应的光学传递函数 $\hat{H}$。偏振测量通道目标图像由

$$\hat{O} = \frac{S}{\hat{H}} = \frac{S\hat{H}^*}{|\hat{H}|^2 + \sigma} \tag{3}$$

退卷积方法进行重建，其中，σ 为引入的正则项因子，避免零频点对结果造成影响；$\hat{H}^*$ 为 $\hat{H}$ 的共轭。

为提高重建精度，更精确地估计目标信息，通常应用多帧图像进行计算，多帧重建对应的公式为

$$\hat{O} = \frac{\sum S\hat{H}^*}{\sum |\hat{H}|^2 + \sigma} . \tag{4}$$

1.2　偏振信号的重建与解调

在偏振测量时，由于探测器只对光强信息敏感，需要借助偏振分析器将偏振信号调制到光强信号上进行观测，再由观测到的图像解调偏振信息。如希望得到圆偏振 v 信号，需要在较短的时间间隔内测量不同偏振状态的两组调制信号：

$$p_1 = i + v \ , \quad p_2 = i - v \ , \tag{5}$$

进而通过 $2v = p_1 - p_2$ 得到 v 信号，式中 i 为背景光强信号；v 为圆偏振信号。

为了消除大气湍流对观测造成的影响，得到高分辨率的太阳偏振图像，我们需要对调制信号进行重建，经过重建再解调得到的 v 信号可以表示为

$$2\hat{V} = \hat{P}_1 - \hat{P}_2 = \frac{\sum_{i=0}^{n} (I+V) H_i \hat{H}_i^*}{\sum_{i=0}^{n} |\hat{H}_i|^2 + \sigma} - \frac{\sum_{j=0}^{n} (I-V) H_j \hat{H}_j^*}{\sum_{j=0}^{n} |\hat{H}_j|^2 + \sigma} , \tag{6}$$

$$\hat{v} = \mathcal{F}^{-1}\{\hat{V}\} , \tag{7}$$

其中，I 和 V 分别为真实光强信号和圆偏振信号的频谱；H_i 为不同帧的 p_1 调制态图像经历的波前像差对应的光学传递函数；H_j 为不同帧的 p_2 调制态图像经历的波前像差对应的光学传递函数；$\hat{H}$ 为真实光学传递函数 H 的估计值；$\hat{P}$ 为对调制目标 P 的估计结果；$\hat{V}$ 为重建的偏振信号；$\mathcal{F}^{-1}$ 表示傅里叶逆变换；$\hat{v}$ 为重建的圆偏振信号。(6)式可以进一步简化为

$$2\hat{V} = I \left(\frac{\sum_{i=0}^{n} H_i \hat{H}_i^*}{\sum_{i=0}^{n} |\hat{H}_i|^2 + \sigma} - \frac{\sum_{j=0}^{n} H_j \hat{H}_j^*}{\sum_{j=0}^{n} |\hat{H}_j|^2 + \sigma} \right) + V \left(\frac{\sum_{i=0}^{n} H_i \hat{H}_i^*}{\sum_{i=0}^{n} |\hat{H}_i|^2 + \sigma} + \frac{\sum_{j=0}^{n} H_j \hat{H}_j^*}{\sum_{j=0}^{n} |\hat{H}_j|^2 + \sigma} \right) . \tag{8}$$

由(8)式可以得出，在估计出偏振测量通道图像的光学传递函数 $\hat{H}$ 后，重建的偏振信号 $\hat{V}$ 由两部分组成，前半部分为与 I 相关的变量，后半部分为与 V 相关的变量。当光学传递函数估计不准确时，会引入 I 向 V 信号的串扰，该串扰对 V 信号的准确性带来一定影响。

1.3　仿真模型

为研究波前像差的估计误差对偏振图像重建质量的影响，对(8)式的过程进行仿真。选定图 2 的磁流体动力学仿真得到的太阳宁静区光强信号和圆偏振信号作为观测目标 i 和 v，使用 0.01 nm 带宽的里奥滤光器透过率曲线对图像进行卷积，并以光强信号的最大值进行归一化，信号强度 $V/I_c \in [-0.214, 0.111]$，同时包含不同强度的偏振信号。图像大小为 1 008 × 1 008 像素，相应的视场为 8″× 8″，接近一个等晕区的大小，对应的调制目标像如图 3。

通过生成一组泽尼克(Zernike)多项式系数，将其表征的泽尼克像差作为仿真用的真实波前像差 φ，对应的视宁度由经验公式

$$\sigma^2 = 0.134(D/r_0)^{5/3} \tag{9}$$

推论得到，其中，σ^2 为该波前像差的方差；D 为望远镜口径；r_0 为估算的视宁度。

我们使用少于真实波前像差阶数的泽尼克多项式对真实波前像差进行拟合，作为波前估计的结果 $\hat{\varphi}$(由于泽尼克多项式表征的波前像差的前 3 项分别为平移误差、x 方向和 y 方向的倾斜，不能由波前探测得到，但可以通过互相关等方法消除影响，故本文实验所用波前像差均不含平移和倾斜像差)：

$$\hat{\varphi} = \sum_{i=3}^{n} a_i Z_i \ , \tag{10}$$

则波前估计误差 $\Delta\varphi$ 主要为未准确估计的低阶像差和残余高阶像差。由波前像差 φ 和 $\hat{\varphi}$，结合望远镜孔径函数计算得到真实的光学传递函数 H 和光学传递函数的估计值 $\hat{H}$。重建的偏振信号 $\hat{v}$ 由(8)式计算得到，i 向 v 的串扰 ic 由(8)式的前半部分计算得到：

$$2ic = \mathcal{F}^{-1}\left\{I\left(\frac{\sum_{i=0}^{n} H_i\hat{H}_i^*}{\sum_{i=0}^{n}|\hat{H}_i|^2+\sigma}-\frac{\sum_{j=0}^{n} H_j\hat{H}_j^*}{\sum_{j=0}^{n}|\hat{H}_j|^2+\sigma}\right)\right\}. \tag{11}$$

为方便对照，引入一个参考图像作为对比，重建过程中使用真实波前像差作为波前估计的结果，即 $\hat{\varphi}_r(x, y)=\varphi(x, y)$。

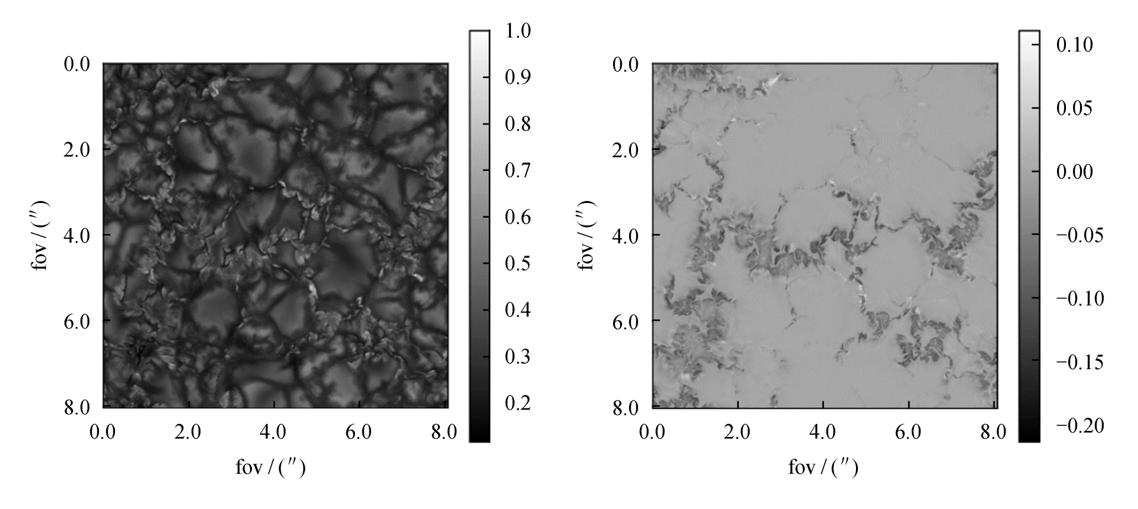


图 2 观测目标 i 和 v，以光强信号的强度做归一化

Fig. 2 Object i and v, normalized with the max intensity of the i signal

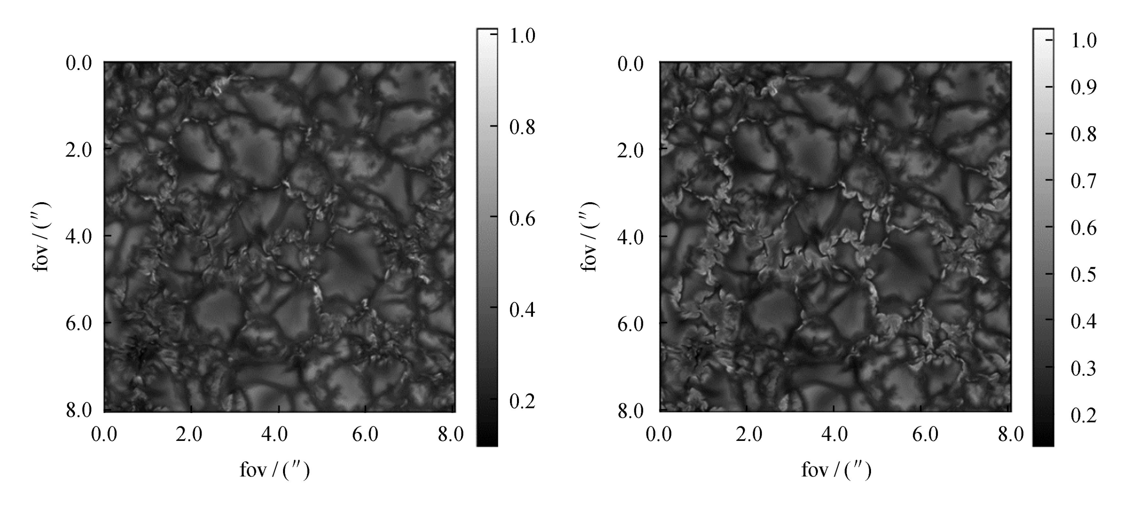


图 3 调制后的目标图像 $i+v$ 和 $i-v$

Fig. 3 Modulated object image $i+v$ and $i-v$

2 仿真结果分析和讨论

2.1 帧数对偏振图像重建质量的影响

如图 4 为视宁度为 10 cm，波前复原残差的均方根(Root Mean Square，RMS)约为 0.107 λ，使用

单帧短曝光图像重建的 v 图像。与波前估计准确的参考图像相比，存在较多的伪结构，与 ic 部分的串扰相比，该部分伪结构主要来自 i 的串扰。产生这些结构的主要原因是对波前像差估计不准确，导致部分频率放大，不能准确估计目标频谱，且受到较严重的串扰。图 4 中方框内分别为平均偏振强度为 2%(区域①)和 3×10^{-4}(区域②)的两个区域。

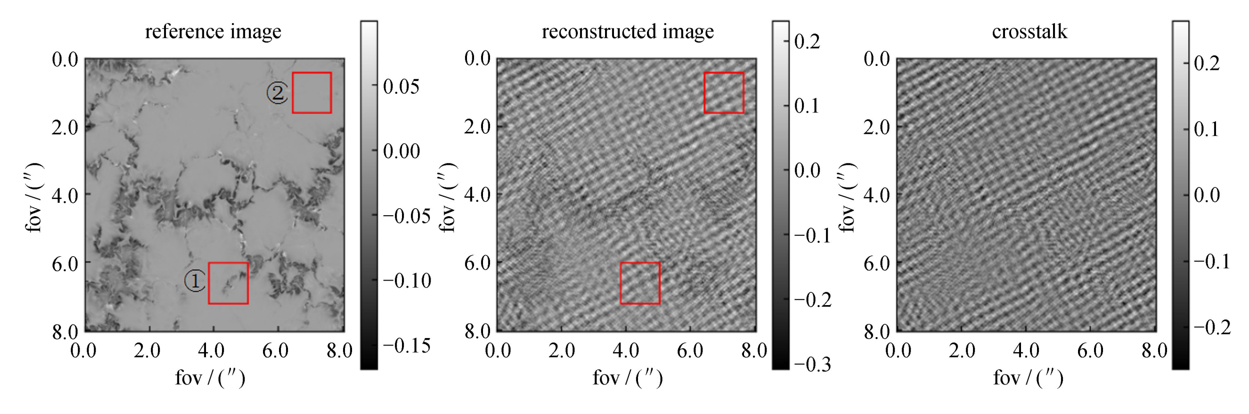


图 4　参考图像、重建的 v 信号及 i 向 v 的串扰

Fig. 4　Reference image, reconstructed v image, and i crosstalk

在该重建方法中，我们可以获得每一帧采集的偏振调制图像对应的波前像差，在较短的时间间隔内，可以认为太阳结构没有发生改变，故采用(4)式的方法借助多帧图像对观测目标进行重建。增加用于偏振图像重建的图像帧数可以解决单帧波前估计不准确造成的部分频率分量放大的问题，改善图像重建质量，图 5 展示了帧数分别为 1，3，6，10，15，21，28，36，45 和 55 时，图 4 中两个区域的重建结果。随着帧数增加，区域①对应的强偏振信号与参考图像不断接近，区域②对应的弱偏振信号则始终无法重建。如图 6 每一列为不同帧数下重建的区域②图像与 i 信号串扰的对比，我们发现区域②的偏振信号均被串扰淹没，除部分信号较强的区域外，始终无法与串扰区分。若将此偏振信号用于磁场反演，会导致错误的磁场测量结果。

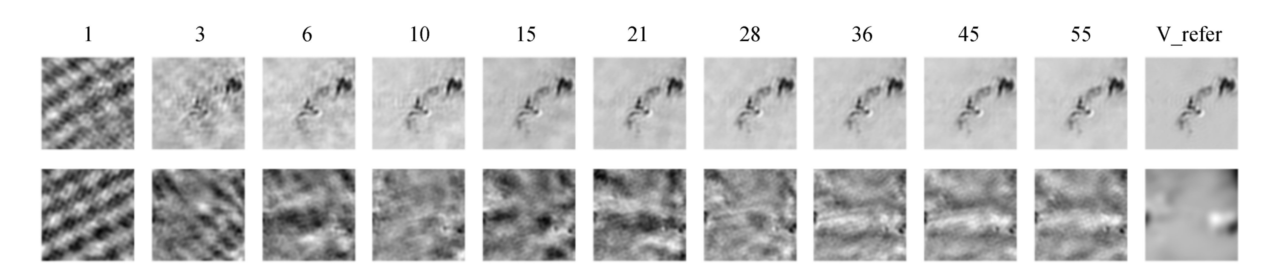


图 5　不同帧数时两个区域的重建效果。第 1 行图像为区域①的重建结果，第 2 行图像为区域②的重建结果，从左至右帧数不断增加，最右侧为参考图像

Fig. 5　Result of two areas at different frame number. The first row of images is the reconstruction result of area one, and the second is the reconstruction result of area two. The number of frames increases continuously from left to right, with the reference image at the far right

增加图像帧数可以降低串扰的水平，但对于强度较小的偏振信号，仍较难与串扰区分。图 7(a)和图 7(b)分别为区域①和区域②重建的 v 信号与 i 串扰的 pv 值和标准差与重建图像帧数之间的关系。从图中可以看出，随着帧数增加，i 串扰的 pv 值和标准差均迅速下降，在 30 帧后下降速度逐渐放缓。对区域①的重建图像来讲，i 串扰的 pv 值和标准差均小于 v 信号的值，故可以分辨 v 信号；而对于区域②的重建图像，i 串扰的 pv 值和标准差均与 v 信号的值接近，即真实 v 信号始终受 i 串扰影响。在一定的波前复原精度和有限的帧数内，由于 i 的串扰，无法准确测量较弱的偏振信号。

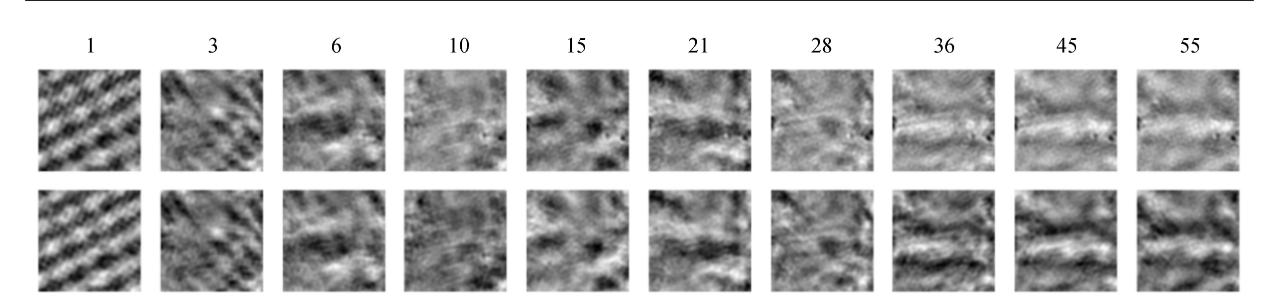


图 6　区域②中的 v 信号和 i 的串扰。第 1 行为重建的 v 信号，第 2 行为 i 的串扰

Fig. 6　Reconstructed v image and i crosstalk of area two. The first row of images is the reconstruction result of v image, and the second is the corresponding crosstalk

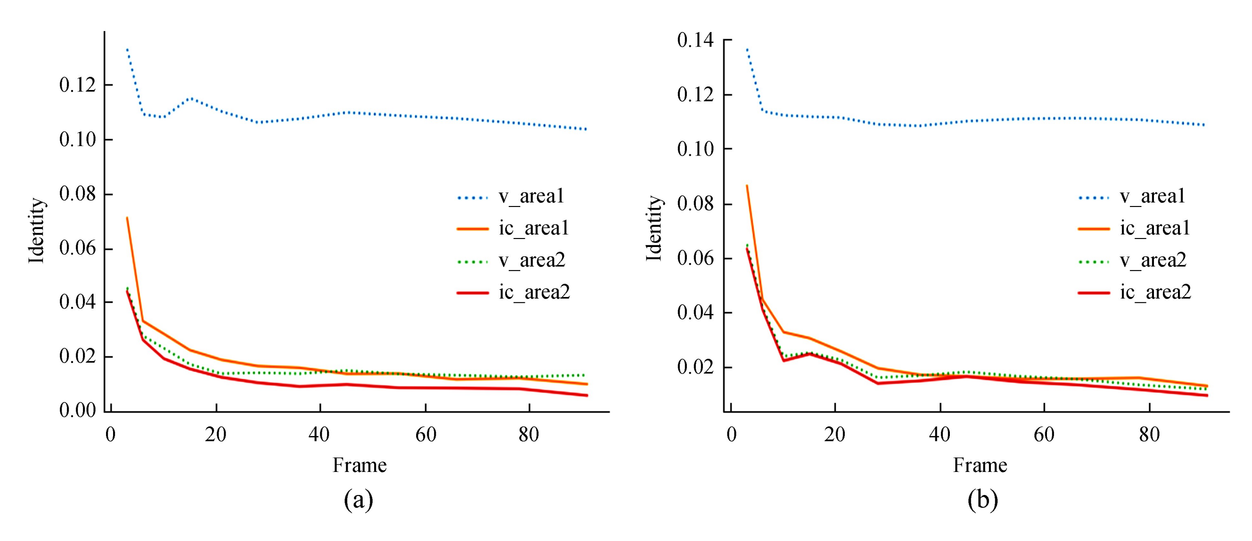


图 7　不同帧数下两个区域 v 信号和 i 串扰的数值对比。其中(a)为 pv 值对比，(b)为标准差的对比。图中蓝色点线表示区域①的 v 信号，绿色点线表示区域②的 v 信号，黄色实线表示区域①的串扰信号，红色实线表示区域②的串扰信号

Fig. 7　Comparison of v signal and i crosstalk in two areas at different frame number. (a) is the comparison of pv values, and (b) is the comparison of standard deviations. The blue dotted line in the figure represents the v signal in area one, the green dotted line represents the v signal in area two, the yellow solid line represents the crosstalk signal in area one, and the red solid line represents the crosstalk signal in area two

2.2　不同视宁度下偏振图像的重建质量

视宁度是衡量大气湍流对地基观测影响程度的重要指标。抚仙湖太阳观测站是世界上视宁度条件最好的太阳观测台站之一，夏季视宁度均值为 11.9 cm，冬季视宁度均值约为 7.8 cm[11]。本节对不同视宁度和不同波前探测精度下，重建图像质量进行仿真分析。表 1 为实验用到的不同视宁度波前像差 φ 的均方根及对其估计结果 $\hat{\varphi}$ 的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)。

表 1　不同视宁度波前像差的均方根

Table 1　RMS of wavefront aberrations with different seeing

Seeing /cm	φ_rms (λ)	$\hat{\varphi}$_rmse (λ)	Seeing /cm	φ_rms (λ)	$\hat{\varphi}$_rmse (λ)
7	0.496	0.139	11	0.315	0.096
8	0.444	0.128	12	0.318	0.090
9	0.409	0.117	13	0.302	0.085
10	0.359	0.107	14	0.262	0.079

对 30 帧短曝光调制图像重建的偏振信号进行对比，结果如图 8。在视宁度较好的情况下，v 信号的重建结果在图 4 的偏振信号强度不同的两个区域内均不断接近理想情况。对不同视宁度下重建的 v 信号的功率谱进行对比，如图 9。由图 9 可以看出，视宁度条件越好，对 v 信号的中高频信息估计越准确。

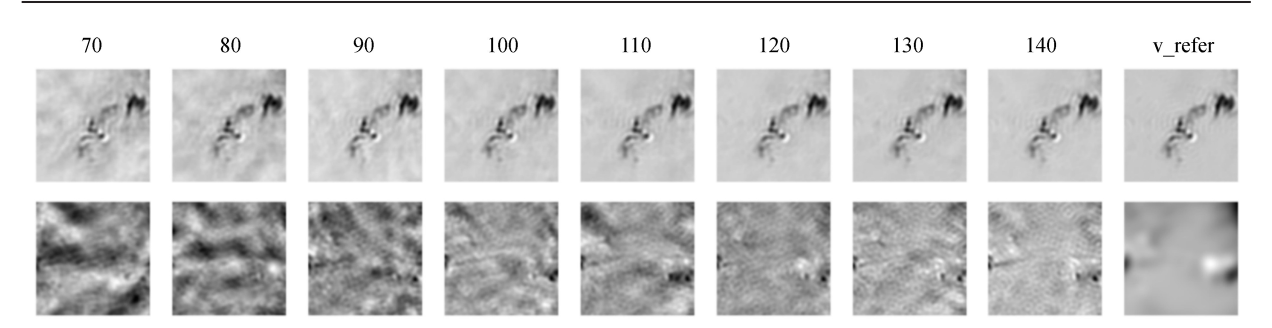


图 8　不同视宁度条件下两区域的重建效果。第 1 行图像为区域①的重建结果，第 2 行图像为区域②的重建结果，从左至右为视宁度不断增加，最右侧为参考图像

Fig. 8　Reconstruction results of two areas under different seeing. The first row of images is the reconstruction result of area one, and the second is the reconstruction result of area two. The seeing increases continuously from left to right, with the reference image at the far right

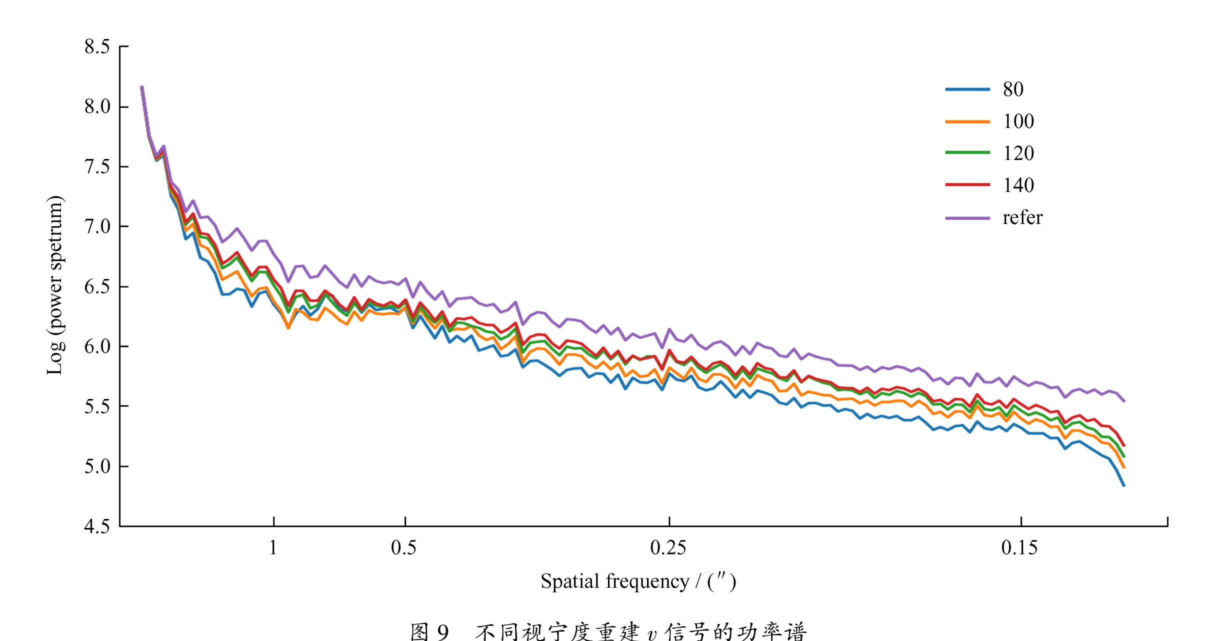


图 9　不同视宁度重建 v 信号的功率谱

Fig. 9　Power spectrum of reconstructed image at different seeing

在该组对比数据中，视宁度良好的条件下，波前复原精度也比较高，无法区分两个因素对 v 信号重建的具体影响。增加一组视宁度分别为 80 mm，100 mm 和 120 mm，波前复原精度均为 0. 128 λ 的对照实验。该组波前像差重建的 v 信号的功率谱如图 10。在相同的波前复原精度下，不同视宁度时重建图像的串扰水平相当，但视宁度条件更好时，对 v 信号的中高频信息的估计也更准确。其主要原因是更好的视宁度下，观测到的退化图像受到大气湍流的影响更小，图像保留的信息更丰富，重建难度也越小。

2. 3　降低采样分辨率对偏振图像重建误差的影响

为满足天文观测对精确测量的需求，天文用探测器通常工作在“binning”模式下，即将多个像素合并成一个像素，以收集更多数量的光子，这种处理数据的方式通过牺牲部分空间分辨率以实现更高精度的测量[12]。本节对“binning”模式下光强信号的串扰进行仿真。

如图 11 为分辨率分别对应 1 m 口径望远镜和 50 cm 口径望远镜的衍射极限角分辨率的两组图像，视宁度为 10 cm，使用 30 帧短曝光图像重建的偏振信号和其对应的串扰。与 1 m 口径望远镜对应的分辨率相比，降低分辨率使得重建信号的变化范围更小，且 i 信号的串扰也大幅降低。表 2 为不同分辨率下，不同视宁度对应串扰的 pv 值和标准差。由表 2 可以看出，在任一视宁度下，分辨率降低的同

时也可以降低串扰的 pv 值和标准差，使重建的偏振信号更准确。在实际观测时，我们可以针对观测目标的强度选择合适的分辨率和偏振测量精度，制定相应的观测计划。

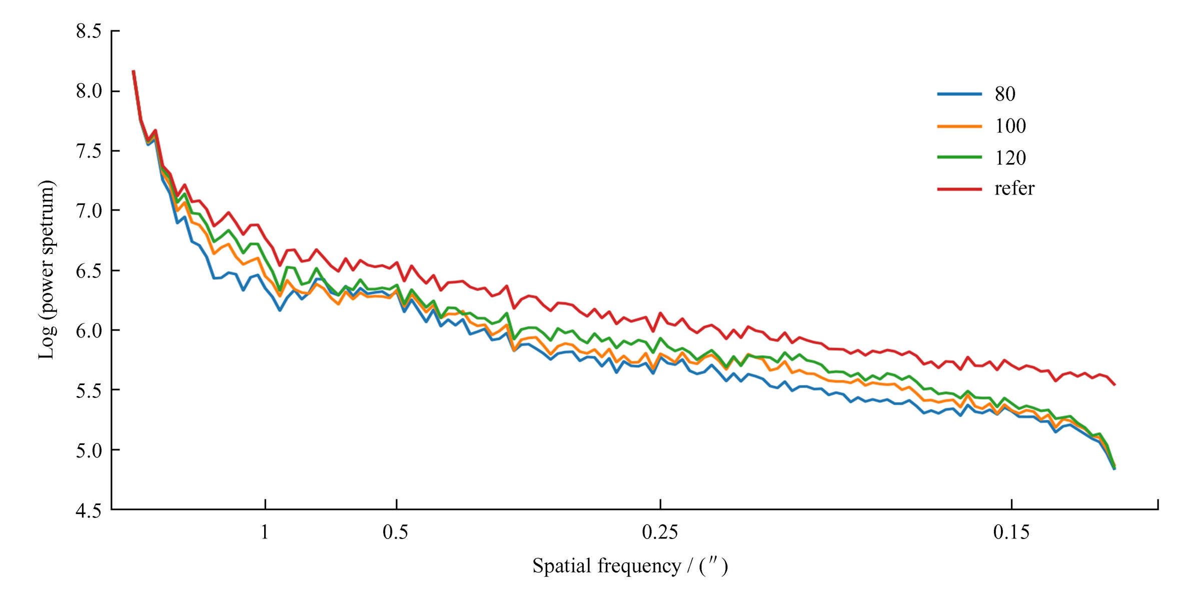


图 10　不同视宁度、相同波前复原精度下重建 v 信号的功率谱

Fig. 10　Power spectrum of reconstructed image at different seeing but same wavefront estimation accuracy

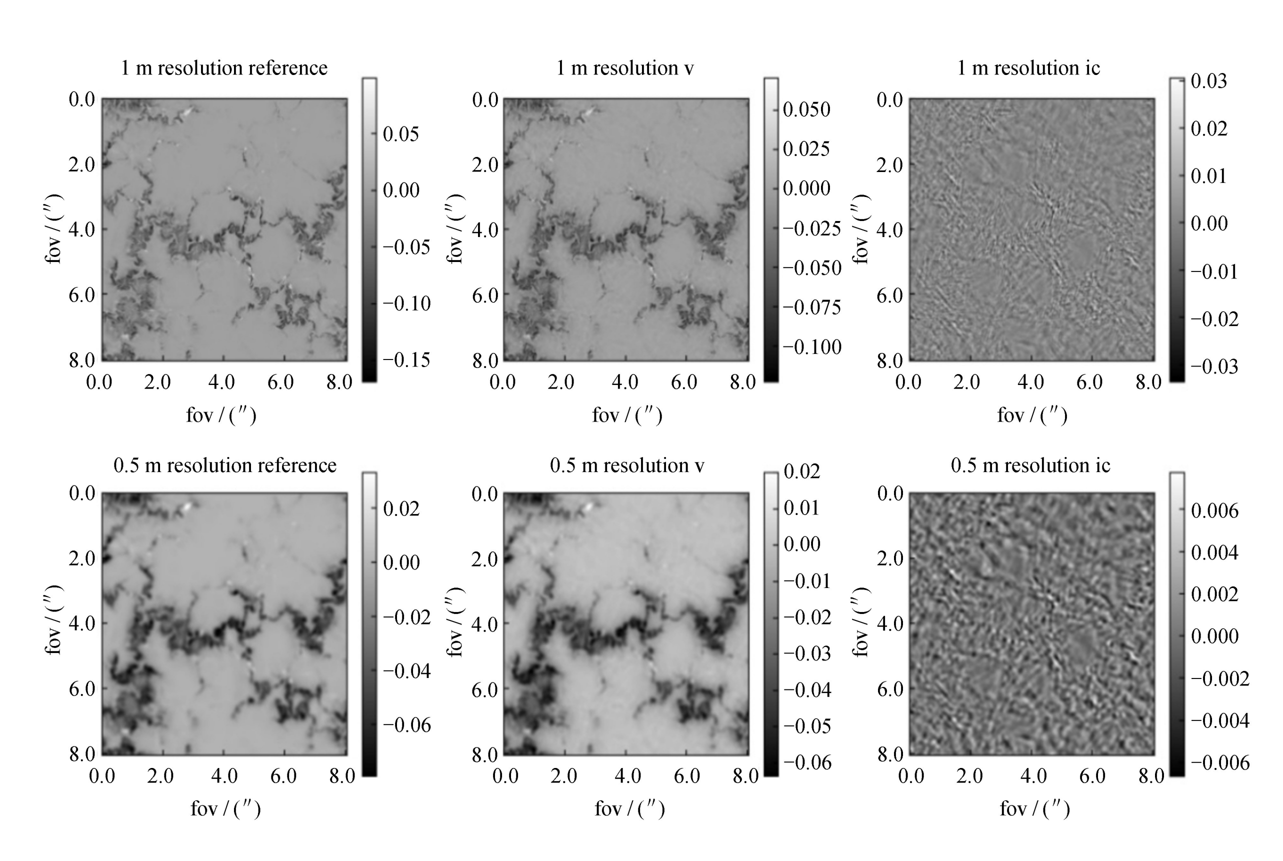


图 11　不同分辨率下的参考图像、重建图像和串扰。其中第 1 行图像对应 1 m 口径望远镜的衍射极限分辨率，第 2 行图像对应 50 cm 口径望远镜的衍射极限分辨率

Fig. 11　Reference image, reconstructed v image and i crosstalk at different resolutions. The first row of images corresponds to the diffraction limit resolution of a 1 m aperture telescope, and the second row of images corresponds to the diffraction limit resolution of a 50 cm aperture telescope

表 2 不同视宁度和分辨率下的串扰的 *pv* 值和标准差

Table 2 *pv* value and standard deviation of crosstalk under different astronomical seeing and resolution

Seeing /cm	*std*			*pv*		
	1 m	0.8 m	0.5 m	1 m	0.8 m	0.5 m
70	0.003 7	0.002 3	0.001 8	0.042	0.019	0.014
80	0.003 8	0.002 3	0.001 7	0.044	0.022	0.016 6
90	0.002 6	0.001 4	0.000 9	0.033	0.015	0.01
100	0.002 2	0.001 1	0.000 7	0.032	0.013	0.007
110	0.001 9	0.001 1	0.000 8	0.028	0.011	0.006 9
120	0.001 52	0.000 7	0.000 47	0.021	0.009	0.005 6
130	0.001 53	0.000 7	0.000 47	0.024	0.008	0.005 1
140	0.001 2	0.000 6	0.000 4	0.017	0.007	0.004 5

3 结 论

本文对太阳偏振图像高分辨重建过程中，由于波前估计不准确引入的重建误差进行了仿真分析。由于波前探测器的阶数有限，不同波前探测方法的波前估计结果与真实大气波前有一定偏差，该估计误差对偏振图像高分辨重建的主要影响是无法准确估计偏振信号的中高频信息，且会引入光强信号的串扰。

仿真结果表明，对于较强的太阳活动区磁场或者达到数十高斯的宁静区磁场，其偏振信号强度超过 1%量级，重建的偏振图像受背景光强串扰的影响较低；而对于磁场强度较弱的宁静区磁场，或者在线偏振信号测量时，偏振信号的强度较弱，重建的偏振图像受光强的串扰较严重，难以分离。

在偏振观测中，增加用于图像重建的帧数、通过 binning 模式采集图像降低分辨率再进行重建等方法可以降低偏振信号受光强串扰的影响。随着帧数增加，光强信号的串扰不断降低，但其降低的速度不断减小，在实际的偏振测量中，过多的帧数用于偏振图像重建将牺牲部分时间分辨率。同理，通过降低像元分辨率的方法采集偏振图像在降低光强信号串扰的同时也会降低图像的空间分辨率。我们需要针对具体的观测目标权衡偏振图像的时间分辨率、空间分辨率和偏振测量精度，进而制定相应的观测模式。同时，一个具有优良视宁度的观测台站也是进行高分辨率太阳偏振测量必不可少的条件。

参考文献：

[1] STENFLO J O. Solar magnetic fields as revealed by Stokes polarimetry [J]. Astronomy and Astrophysics Review, 2013, 21(1): 66.

[2] RIMMELE T R, MARINO J. Solar adaptive optics [C] // Proceedings of SPIE. 2011.

[3] LÖFDAHL M G, VAN NOORT M J, DENKER C. Solar image restoration [C] // Proceedings of the International Workshop on Modern Solar Facilities-Advanced Solar Science. 2007.

[4] LIU Z, XU J, GU B Z, et al. New vacuum solar telescope and observations with high resolution [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2014, 14(6): 705.

[5] 侯俊峰，邓元勇，王东光，等. 液晶调制技术在太阳磁场探测中的应用及展望 [J]. 航天器环境工程，2021，38(3)：296-304.
HOU J F, DENG Y Y, WANG D G, et al. Application and prospect of liquid crystal modulation technology in solar magnetic field detection [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38 (3): 296-304.

[6] KELLER C U, VON DER LÜEHE O. Solar speckle polarimetry [J]. Astronomy and Astrophysics, 1992, 261(1): 321-328.

[7] DE LA CRUZ RODRÍGUEZ J, LÖFDAHL M G, SÜTTERLIN P, et al. CRISPRED: a data pipeline for the CRISP imaging spectropolarimeter [J]. Astronomy and Astrophysics, 2015, 573(3): A40.

[8] PUSCHMANN K G, DENKER C, KNEER F, et al. The GREGOR Fabry-Pérot interferometer [J]. Astronomische Nachrichten, 2012, 333(9): 880-893.

[9] CAO W, GOODE P R, AHN K, et al. NIRIS: the second generation near-infrared imaging spectro-polarimeter for the 1.6 meter New Solar Telescope [C]// Proceedings of the Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 2012: 291-299.

[10] PAXMAN R G, THELEN B J, MURPHY R J, et al. Phase-diverse adaptive optics for future telescopes [C]// Proceedings of SPIE. 2007: 8-22.

[11] CHEN L H, LIU Z, CHEN D. Climatological analysis of the seeing at Fuxian Solar Observatory [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2019, 19(1): 015.

[12] IGLESIAS F A, FELLER A. Instrumentation for solar spectropolarimetry: state of the art and prospects [J]. Optical Engineering, 2019, 58(8): 082417.

Simulation Analysis of High Resolution Reconstruction Errors in Solar Polarization Images

Lv Zhuo[1,2,3], Wang Xiqun[1,2,3], Wang Yuanfangzhou[1,2,4,5], Jin Zhenyu[1,3*]

(1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China, Email: kim@ynao.ac.cn;
2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Yunnan Key Laboratory of Solar Physics and Space Science, Kunming 650216, China;
4. School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;
5. Yunnan Key Laboratory of Opto-electronic Information Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The magnetic imager of ground-based solar telescope will be affected by atmospheric turbulence during polarimetry, resulting in inaccurate measurement results. By synchronously detecting the wavefront aberration, and to use deconvolution reconstruction of the sun′s narrow band polarization image, the poor photons problem caused by the narrow band filter can be overcome. The high-resolution image reconstruction algorithm is applied to the reconstruction of the sun′s polarized image. During the reconstruction process, inaccurate wavefront sensing result can lead to I crosstalk between the reconstructed polarization image and the real polarization signal, resulting in certain difference. To study the impact of wavefront sensing accuracy on polarization image reconstruction accuracy during the reduction, a simulation model is established in this paper to study the I crosstalk of polarimetry results under different seeing and wavefront sensing accuracy. The results indicate that the reconstruction quality of polarized images is positively correlated with the accuracy of wavefront sensing. Under certain conditions, increasing the number of frames used for image reconstruction and reducing image resolution can also reduce the $I \rightarrow QUV$ crosstalk.

Key words: solar polarimetry; high resolution image reconstruction; wavefront sensing; error analysis